



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DAS CAMADAS E-ESPORÁDICAS
NA REGIÃO CENTRAL DA ANOMALIA MAGNÉTICA DA
AMÉRICA DO SUL (AMAS)**

Giovana Stefani

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr. Juliano
Moro e Coorientada pelo Dr. Clezio Marcos
De Nardin

INPE
São José dos Campos
2022

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DAS CAMADAS E-ESPORÁDICAS
NA REGIÃO CENTRAL DA ANOMALIA MAGNÉTICA DA
AMÉRICA DO SUL (AMAS)**

Giovana Stefani

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr. Juliano
Moro e Coorientada pelo Dr. Clezio Marcos
De Nardin

INPE
São José dos Campos
2022

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, **Marli Valgoi Stefani**, e meu pai, **Luis Stefani**, por todos os ensinamentos e incentivo desde sempre. Ao meu irmão, **Giovane Luis Stefani**, pelo companheirismo e parceria.

Ao meu amor, **Pedro Henrique Vestena Rossato**, pelas inúmeras horas em vídeo chamada durante esse período turbulento que enfrentamos, pela força e auxílio para que eu pudesse realizar este trabalho da melhor forma possível.

Às minhas amigas e colegas do curso de Física, **Heloísa Suffert Acosta** e **Yolanda Maria Barros Marcello**, por sempre acreditarem em meu potencial, pela motivação, sororidade e auxílio em cada etapa deste projeto.

Ao meu orientador, **Dr. Juliano Moro**, ao qual nutro uma enorme admiração, não apenas como profissional, mas também como pessoa. Por ter aceitado me orientar na Iniciação Científica e também no Trabalho de Conclusão de Curso. Obrigada por todos os ensinamentos, por todo o tempo dedicado a mim e a minha formação como cientista e como pessoa.

Ao meu coorientador e direcionador, **Dr. Clezio Marcos de Nardin**, por toda atenção, por cada palavra de incentivo que me fizeram ter certeza que eu poderia realizar este e quaisquer outros objetivos.

À **Dra. Laysa Resende**, colega de grupo e amiga, que prontamente se colocou a disposição para obter e nos fornecer dados do MIRE. Sem sua contribuição este trabalho não poderia ter sido concluído.

Aos demais colegas de grupo APOENA, **Amanda Navarro**, **Amanda Piassi**, **Dra. Carolina do Carmo**, **Dra. Esmeralda Hernández**, **Giorgio Picanço**, **Jaziel Campelo**, **Dr. Paulo Nogueira**, **Dra. Régia Pereira**, **Sony Su Chen**, pessoas e profissionais maravilhosos em que busco inspiração e apoio.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/MCTI)** pela concessão da bolsa que me auxiliou e incentivou durante todo este período, e ao **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCTI)** pela oportunidade.

A todas as mulheres que, antes de mim, foram à luta para que hoje eu pudesse ocupar este espaço, e prosseguir na luta por nossos direitos.

RESUMO

As camadas E-Esporádicas (Es) são adensamentos do plasma na região E da ionosfera que apresentam alta variabilidade. A análise dos dados coletados entre julho de 2019 e junho de 2020 por uma Digissonda instalada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) mostrou a ocorrência de diversos tipos de camadas Es: Es_f (*flat*), Es_l (*low*), Es_c (*cusp*), Es_h (*high*), Es_s (*slant*), e Es_a (*auroral*). Este trabalho teve como objetivo analisar as frequências de topo (ftEs) e de bloqueio (fbEs) a fim de obter suas características em função da hora local, meses do ano, estação do ano e atividade geomagnética. Além disso, os dados observacionais foram comparados com camadas Es obtidas com o Modelo Ionosférico da Região E (MIRE) para verificar o mecanismo de cisalhamento de ventos sobre Santa Maria. Foi considerado um estudo de caso para cada estação do ano. Os resultados mostram que os maiores valores de ftEs e fbEs ocorreram durante a incidência da radiação solar. Os maiores valores encontrados podem superar 10 MHz nos dois parâmetros. Com relação a modelagem, foi encontrado que a componente zonal dos ventos neutros é mais intensa que a componente meridional. Com relação às camadas Es simuladas usando o MIRE, encontrou-se períodos com similaridades e diferenças com os dados observacionais que são apresentadas e discutidas.

Palavras-chave: Camadas E-Esporádicas. Anomalia Magnética da América do Sul. Digissonda.

ABSTRACT

The Sporadic-E (Es) layers are plasma densifications in the E region of the ionosphere that show high variability. The analysis of data collected between July 2019 and June 2020 by a Digisonde installed at the Federal University of Santa Maria (UFSM) showed the occurrence of different types of Es layers: Es_f (flat), Es_l (low), Es_c (cusp), Es_h (high), Es_s (slant), and Es_a (auroral). This work aimed to analyze the top (ftEs) and blocking (fbEs) frequencies in order to obtain their characteristics as a function of local time, months of the year, season of the year and geomagnetic activity. In addition, observational data were compared with Es layers obtained with the E Region Ionospheric Model (MIRE) to verify the wind shear mechanism over Santa Maria. A case study was considered for each season of the year. The results show that the highest values of ftEs and fbEs occurred during the incidence of solar radiation. The highest values found can exceed 10 MHz in both parameters. Regarding modeling, it was found that the zonal component of the neutral winds is more intense than the meridional component. Regarding the Es layers simulated using MIRE, periods with similarities and differences were found with the observational data that are presented and discussed.

Keywords: Sporadic-E (Es) Layers. South America Magnetic Anomaly (SAMA). Digisonde.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 – Representação da heliosfera, com suas principais regiões e elementos, contendo, ao centro, o Sistema Solar.....	3
Figura 2.2 – Esboço das várias fontes que contribuem para a formação do campo magnético próximo à Terra.	4
Figura 2.3 – (a) Mapa da distribuição global da magnitude do campo geomagnético para o ano de 2018, obtida por meio do modelo IGRF; (b) Geometria do campo magnético em coordenadas geográficas.....	5
Figura 2.4 – Classificação da atmosfera.....	6
Figura 2.5 – Esquematização do fluxo meridional médio (linhas tracejadas), nos solstícios.	7
Figura 2.6 – Perfil vertical diurno (12h LT (do inglês <i>Local Time</i>)) e noturno 00h LT (do inglês <i>Local Time</i>)) da densidade eletrônica para a região de Cachoeira Paulista no dia 01 de janeiro de 2011, obtido a partir do modelo IRI-2016.	9
Figura 2.7 – Ionogramas ilustrando os diferentes tipos de camadas esporádicas (Es), formadas pela ação dos ventos de maré, sobre Santa Maria, (a) Camada Es _c ; (b) Camada Es _f ; (c) Camada Es _h e (d) Camada Es _l	11
Figura 2.8 – Mecanismo de cisalhamento de ventos: (a) zonal e (b) meridional.	13
Figura 3.1 – Apresentação do sistema da Digissonda localizada em Santa Maria. (a) Antena transmissora; (b) Uma das quatro antenas receptoras; (c) Parte eletrônica (plataformas de controle e de dados).	16
Figura 4.1 – Variações das frequências de topo e bloqueio (ftEs, fbEs) e da altura (h'Es) das camadas Es, ao longo do ano e das estações do ano, sobre Santa Maria.	18
Figura 4.2 – Coeficientes de variabilidade dos parâmetros de frequência (ftEs, fbEs) e da altura virtual da camada Es, sobre Santa Maria, ao longo do ano e das estações do ano.	20
Figura 4.3 – Variações diárias dos parâmetros ftEs, fbEs e h'Es das camadas Es, sobre Santa Maria.....	21

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1 – Características dos tipos de Camadas Esporádicas.....	12
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMAS	– Anomalia Magnética da América do Sul
EEJ	– Eletrojato Equatorial (do inglês <i>Equatorial Electrojet</i>)
EUV	– Extremo Ultravioleta (do inglês <i>Extreme Ultraviolet</i>)
FAC	– Corrente Alinhada ao Campo (do inglês <i>Field Aligned Currents</i>)
FAI	– Irregularidades Alinhadas ao Campo Magnético (do inglês <i>E-region Field-Aligned-Irregularities</i>)
GSWM	– Modelo de onda com escala global (do inglês <i>Global Scale Wave Model</i>)
IGRF	– Campo Geomagnético de Referência Internacional (do inglês <i>International Geomagnetic Reference Field</i>)
IHFAC	– Corrente Alinhada ao Campo Inter-Hemisférico (do inglês <i>Inter-Hemispheric Field-Aligned Current</i>)
IMF	– Campo magnético interplanetário (do inglês <i>Interplanetary Magnetic Field</i>)
LDI	– <i>Lowell Digisonde International</i>
LT	– Horário Local (do inglês <i>Local Time</i>)
MIRE	– Modelo Ionosférico da Região E
SI	– Sistema Internacional de unidades
Sq	– Variação solar calma (do inglês <i>Solar-quiet</i>)
UA	– Unidade Astronômica
UT	– Horário Universal (do inglês <i>Universal Time</i>)
UV	– Ultravioleta (do inglês <i>Ultraviolet</i>),
VHF	– Frequência Muito Alta (do inglês <i>Very High Frequency</i>)
VLISM	– Meio interestelar muito próximo (do inglês <i>Very Local InterStellar Medium</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

B	– Campo magnético
D	– Ângulo da declinação geomagnética
Es	– Camada E-Esporádica
Es _c	– Camada E-Esporádica do tipo cúspide (do inglês <i>cusp</i>)
Es _f	– Camada E-Esporádica do tipo plana (do inglês <i>flat</i>)
Es _h	– Camada E-Esporádica do tipo alta (do inglês <i>high</i>)
Es _l	– Camada E-Esporádica do tipo baixa (do inglês <i>low</i>)
f ₀ E	– Frequência crítica da onda ordinária da camada E (MHz)
f ₀ F1	– Frequência crítica da onda ordinária da camada F1 (MHz)
f ₀ F2	– Frequência crítica da onda ordinária da camada F2 (MHz)
fbEs	– Frequência de bloqueio da camada Es (MHz)
fminE	– Frequência mínima da camada E (MHz)
ftEs	– Máxima frequência de observação da camada Es (MHz)
H	– Componente horizontal do campo geomagnético
h' Es	– Altura virtual mínima da região Es (km)
I	– Ângulo da inclinação geomagnética
I	– Inclinação
Km	– Quilômetros
Kp	– Índice geomagnético
N _i	– Densidade do íon
nT	– Nanotesla
q _i	– Taxa de produção
T	– Tesla
U	– Velocidade dos ventos de maré
V _i	– Velocidade dos íons
x	– Componente norte geográfica do campo geomagnético (Norte)
y	– Componente leste geográfica do campo geomagnético (Oeste)
z	– Componente vertical do campo geomagnético (Zênite)
χ	– Ângulo zenital solar
e	– Carga do elétron
f	– Frequência da onda transmitida pela Digissonda

m	– Massa do elétron
α	– Coeficiente de recombinação
ε_0	– Permissividade elétrica do vácuo
μ	– Índice de refração do plasma ionosférico
ρ	– Densidade do plasma
ω	– Frequência angular da onda transmitida pela Digisonda
ω_p	– Frequência angular do plasma

SUMÁRIO

	<u>Pág</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Meio Interplanetário.....	2
2.2 Campo Geomagnético.....	3
2.3 Atmosfera terrestre.....	6
2.3.1 Oscilações atmosféricas.....	7
2.4 Ionosfera Terrestre	8
2.5 Região E.....	9
2.6 Camadas Es	10
2.6.1 Tipos de Camadas Es.....	10
2.6.2 Formação das camadas Es	12
3 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS.....	14
3.1 Digissonda.....	14
3.2 Metodologia	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1 Análise Estatística dos Parâmetros da Es.....	18
4.1.1 Coeficientes de Variabilidade.....	19
4.2 Variações Diárias dos Parâmetros da Es.....	20
5 CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

Este projeto tem como objetivo aprofundar os estudos sobre as camadas E-Esporádicas (Es) na região de Santa Maria, RS, que iniciou com o Projeto PIBIC/INPE 2020-2021 intitulado “Estudo da variabilidade das camadas E-Esporádicas na região central da Anomalia Magnética da América do Sul”. As camadas Es são adensamentos do plasma na região E que apresentam alta variabilidade dependendo da altura de ocorrência e coordenadas geográficas de observação (Whitehead 1961; Arras et al., 2009; Haldoupis, 2011, Denardini et al., 2016; Resende et al., 2016, 2017). A análise dos dados coletados entre julho de 2019 e junho de 2020 por uma Digissonda instalada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) mostrou a ocorrência de diversos tipos de camadas Es: Es_f (*flat*), Es_l (*low*), Es_c (*cusp*), Es_h (*high*), Es_s (*slant*), e Es_a (*auroral*). Esses tipos ocorrem devido a ventos de marés ou precipitação de partículas energéticas do cinturão de radiação. Esse último mecanismo causa o aparecimento da camada Es do tipo “a”, que é geralmente observada nas regiões aurorais e deve-se, provavelmente, a baixa intensidade do campo geomagnético (aproximadamente 22.000 nT) característico da região central da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS; Batista e Abdu, 1977; Abdu et al., 2005; Moro et al., 2019).

Visando realizar tal aprofundamento, foram analisadas as frequências de topo ($ftEs$) e de bloqueio ($fbEs$) bem como com o parâmetro de altura virtual da camada Es ($h'Es$). A diferença entre as frequências de topo e bloqueio ($\Delta f = ftEs - fbEs$) também foi analisada, visto que, é uma medida da variação do gradiente da densidade eletrônica, que fornece evidências da presença de irregularidades alinhadas ao campo magnético (*E-region- Field-Aligned-Irregularities - FAIs*).

Os parâmetros reduzidos ($ftEs$, $fbEs$, $h'Es$) com o auxílio do *software* SAO-Explorer foram analisados a fim de obter as características das camadas Es em função da hora universal (*Universal Time - UT*), meses do ano, e estações do ano. Com essa análise se obteve um estudo das propriedades estatístico das camadas Es que ocorreram sobre a região de Santa Maria entre junho de 2019 e julho de 2020.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta Seção é apresentada a revisão da bibliografia, realizada no período de agosto a dezembro de 2022. A Seção 2.1 apresenta uma breve discussão sobre o meio interplanetário. A Seção 2.2 apresenta o campo geomagnético, com suas principais características, incluindo suas regiões e estruturas. A definição, características e oscilações da atmosfera terrestre são mostradas na Seção 2.3. A Seção 2.4 aborda a ionosfera terrestre. Na Seção 2.5, apresenta-se a região ionosférica de interesse deste trabalho, a região E, que abrange as camadas Es. A Seção 2.6 é dedicada as camadas Es, foco deste trabalho, onde são apresentados os tipos, e mecanismos de formação.

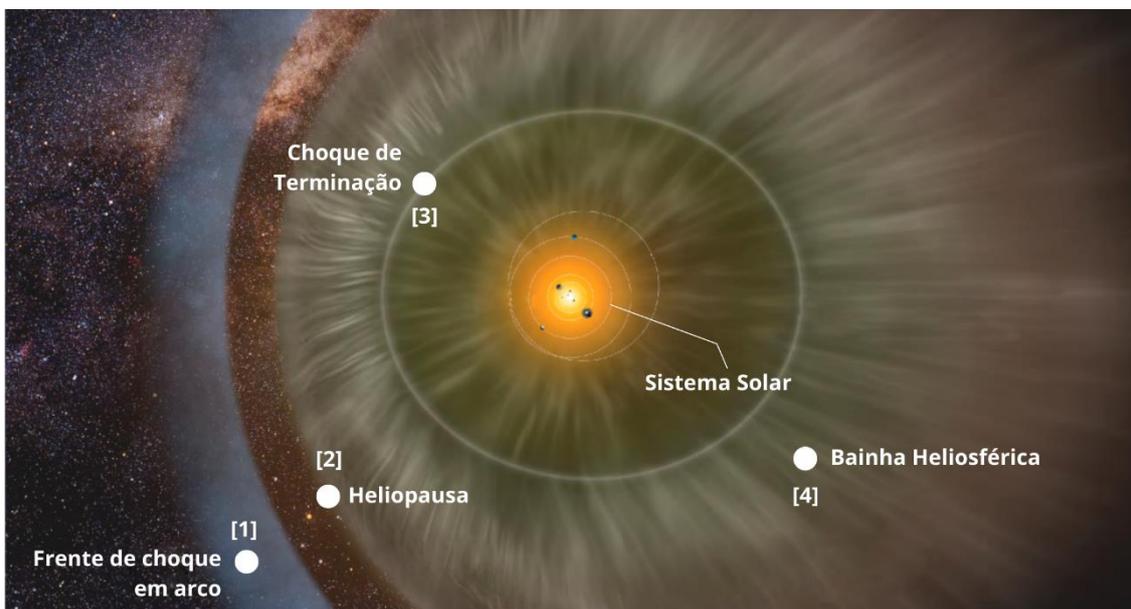
2.1 Meio Interplanetário

O meio interplanetário, ou espaço interplanetário, é a região que abriga os corpos pertencentes ao Sistema Solar. Este espaço é permeado pelo vento solar e pelo campo magnético do Sol e demais planetas, denominado de campo magnético interplanetário (IMF, do inglês *Interplanetary Magnetic Field*) (Kivelson e Russel, 1995; Oliveira et al. 2016). A região no espaço onde estas grandezas são dominantes é chamada de heliosfera.

A heliosfera é cercada pelo meio interestelar, que emana um contínuo fluxo de partículas, denominado vento interestelar. Esse vento, ao se chocar com a heliosfera, faz com que ela se achate na direção do choque (nariz da heliosfera) e se alongue no lado oposto (cauda da heliosfera). A região onde ocorre o choque é denominada de frente de choque em arco, que pode ser visualizada em azul na Figura 2.1 [1] (Oliveira et al. 2014).

O nariz da heliosfera está localizado a cerca de 110 a 120 unidades astronômicas (UA; 1 unidade astronômica = 150 milhões de km) do Sol, enquanto a cauda a aproximadamente 350 UA (Reisenfeld et al. 2021). A fronteira da heliosfera é chamada de heliopausa e pode ser vista na Figura 2.1 [2].

Figura 2.1 – Representação da heliosfera, com suas principais regiões e elementos, contendo, ao centro, o Sistema Solar.



Fonte: Adaptado de NASA/IBEX/Adler Planetarium

O choque de terminação (Figura 2.1 [3]) é a região onde a pressão do vento solar possui a mesma intensidade que a pressão do meio interestelar muito próximo (VLISM, do inglês *Very Local InterStellar Medium*). A região entre a heliopausa e o choque de terminação é chamada de bainha heliosférica (Figura 2.1 [4]) (Oliveira et al. 2014).

Em sua extensão o vento solar se choca com os planetas do Sistema Solar, causando perturbações em seus campos magnéticos (Kivelson e Russel, 1995). Este é o caso do nosso planeta. Para entender melhor os efeitos causados por estas variações no campo geomagnético, precisa-se conhecer melhor as características do campo magnético da Terra.

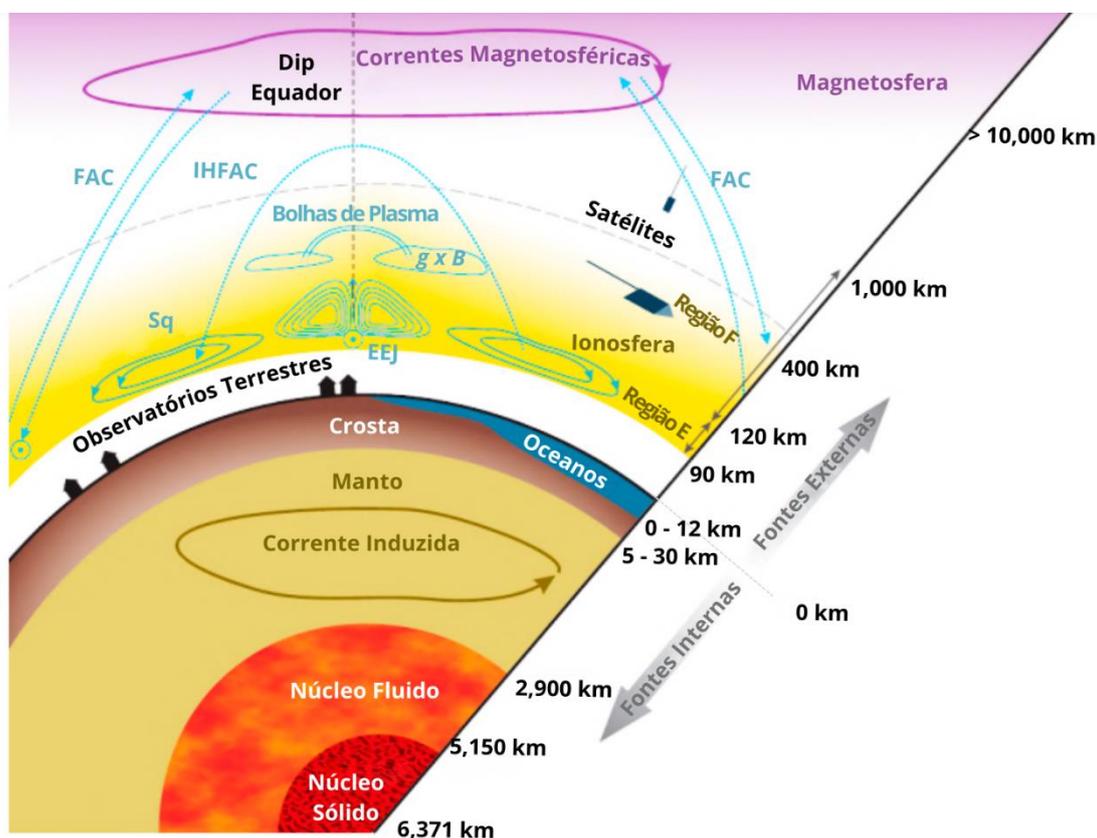
2.2 Campo Geomagnético

O campo geomagnético, ou campo magnético da Terra, é formado por contribuições internas e externas ao planeta. O campo magnético interno é composto pelos campos magnéticos: principal, crustal e induzido. O campo magnético principal é gerado no núcleo da Terra, produzido pela movimentação do núcleo fluido (ferro) este processo recebe o nome de geodínamo e representa 95% do campo geomagnético total (Albareli; Leite, 2016; Olsen; Stolle, 2012). O campo magnético externo é gerado pelas

correntes elétricas que fluem na magnetopausa, na magnetosfera e na ionosfera (Olsen; Stolle, 2012).

A Figura 2.2 nos fornece uma concepção gráfica destas fontes de campo magnético. As correntes elétricas são representadas pelas linhas azuis (contínuas e pontilhadas), sendo as representadas: sistema de correntes Sq (sigla do inglês *Solar quiet*), eletrojato equatorial (EEJ, do inglês *Equatorial Electrojet*), correntes alinhadas ao campo (FAC, do inglês *Field Aligned Currents*), corrente inter-hemisférica alinhada ao campo (IHFAC, do inglês *Inter-Hemispheric Field-Aligned Current*) e correntes magnetosféricas.

Figura 2.2 – Esboço das várias fontes que contribuem para a formação do campo magnético próximo à Terra.



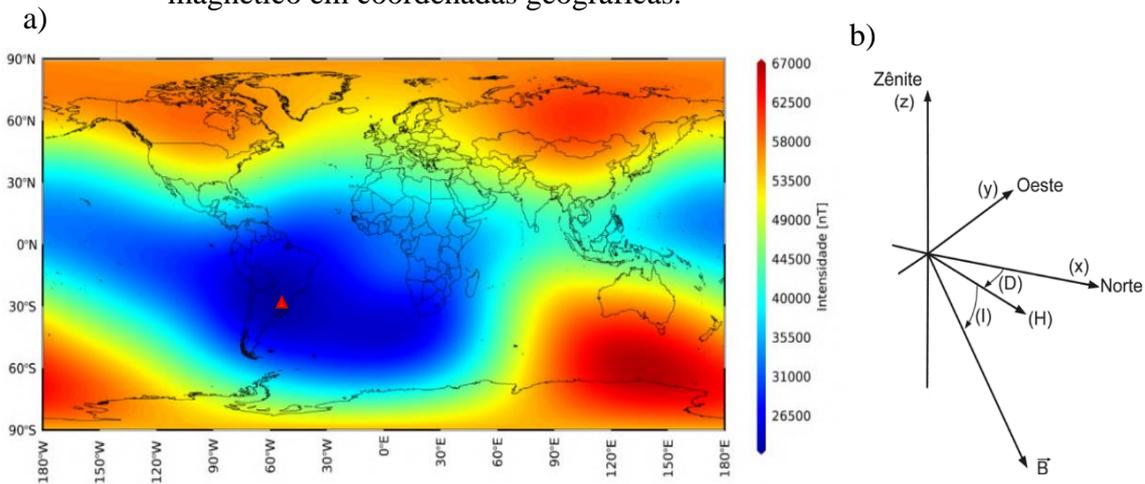
Fonte: Adaptado de Olsen e Stolle (2012).

Por se tratar de uma grandeza vetorial, o campo geomagnético (\mathbf{B}) apresenta magnitude, direção e sentido. Sua magnitude é dada em nanotesla ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$) no Sistema Internacional de unidades (SI). A Figura 2.3(a) foi obtida a partir do modelo de Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF, do inglês *International*

Geomagnetic Reference Field) e nela é possível observar a magnitude do campo geomagnético sobre a superfície terrestre, onde os tons mais quentes representam maiores intensidades de \mathbf{B} e os tons mais frios as menores. A região que apresenta menor intensidade do campo geomagnético dá origem a Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). A AMAS foi descoberta na década de 1950 sendo a sua formação associada ao deslocamento do dipolo magnético da Terra. Devido a este desvio, um campo magnético oposto ao principal é gerado nesta área, enfraquecendo o campo geomagnético resultante (Pinto Jr. et al., 1992). Em virtude de o campo geomagnético estar enfraquecido, a entrada de partículas energéticas na atmosfera terrestre, provenientes do Sol e do Cinturão Interno de Radiação, ocorre mais facilmente, aumentando a possibilidade de se precipitarem e ionizarem os constituintes atmosféricos. A anomalia em questão é dinâmica e apresenta uma deriva para o oeste, cuja região central (triângulo vermelho na Figura 2.3(a)) apresenta valores próximos a 23000 nT (Hartmann e Pacca, 2009).

A Figura 2.3(b) ilustra a geometria de \mathbf{B} por meio de coordenadas geográficas, onde as coordenadas cartesianas x , y e z representam, respectivamente, Norte, Oeste e Zênite. E as demais indicações na figura representam a componente horizontal (H), o ângulo de inclinação (I) e a declinação magnética (D).

Figura 2.3 – (a) Mapa da distribuição global da magnitude do campo geomagnético para o ano de 2018, obtida por meio do modelo IGRF; (b) Geometria do campo magnético em coordenadas geográficas.



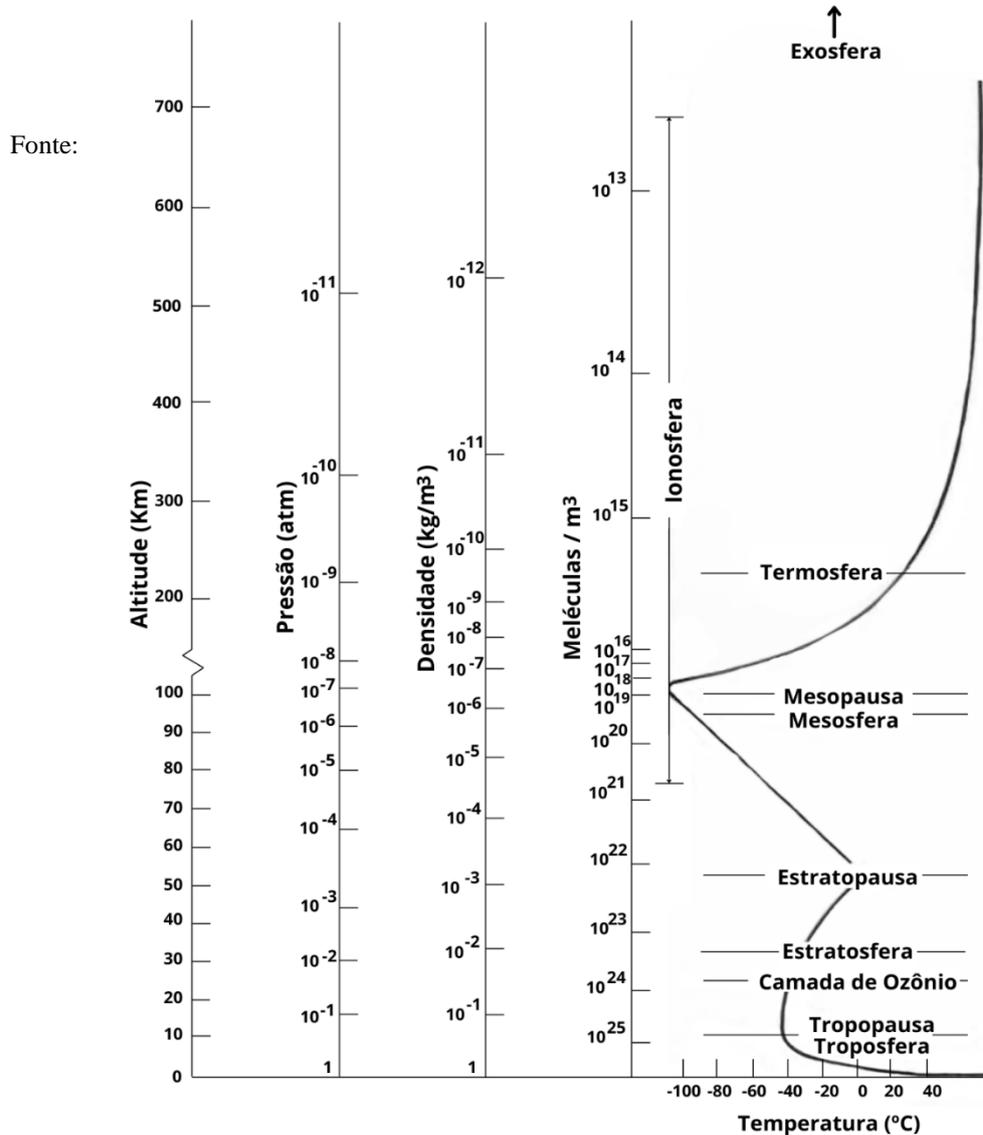
Fonte: a) Adaptado de Chen, 2019; b) Moro, 2015.

2.3 Atmosfera terrestre

A atmosfera é uma camada de gases que envolve a Terra. Esta camada pode ser dividida em 5 regiões, são elas: Troposfera (15-18 km de altura), Estratosfera (15-50 km de altura), Mesosfera (50-100 km de altura), Termosfera (100-400 km de altura) e Exosfera (acima de 400km de altura).

A pressão e a densidade dos gases que a compõe decaem conforme nos afastamos da superfície. A temperatura também varia conforme a altura, com decaimento na Troposfera e Mesosfera e aumento na Estratosfera, Termosfera e Exosfera conforme a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Classificação da atmosfera.



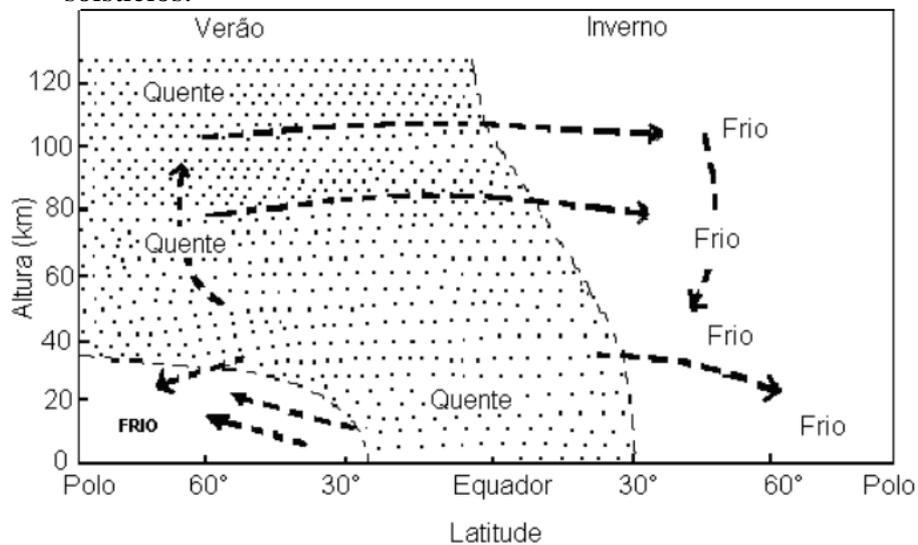
Adaptado de Observatório Nacional, Atmosfera (2011).

2.3.1 Oscilações atmosféricas

As oscilações atmosféricas são causadas pela interação da atmosfera com o movimento de rotação da Terra, causando um recebimento diferencial de energia. Esta diferenciação gera oscilações de menor ou maior escala atmosférica. As principais oscilações de maior escala são as ondas planetárias, os ventos médios e as marés atmosféricas, enquanto a principal oscilação de menor escala é conhecida como ondas de gravidade.

Os ventos médios são as oscilações com maior período registrado na atmosfera. Eles são direcionados pela interação entre a radiação ultravioleta proveniente da energia solar e da infravermelha emitida de volta ao espaço. Nesta interação, o fluido esco meridionalmente (norte-sul), enquanto há uma deflexão no escoamento devido à força de Coriolis, gerando também uma componente zonal (leste-oeste) do vento. A Figura 2.5 ilustra o fluxo do escoamento (Andrioli, 2009).

Figura 2.5 – Esquematisação do fluxo meridional médio (linhas tracejadas), nos solstícios.



Fonte: Adaptada de Murgatroyd (1970).

Diferentemente dos ventos médios, as ondas planetárias possuem duração de dias, sendo as mais comuns na ordem de dois, cinco, oito e dezesseis dias. Elas são estratificadas horizontalmente ao longo da circunferência da Terra, devido a ação da força de Coriolis.

Entre as oscilações de maior escala, as que possuem menor período são as marés atmosféricas. Elas são oscilações ligadas ao período de um dia (24h), sendo classificadas pela sua duração. Por exemplo, uma maré diurna possui um período de 24 horas, uma semidiurna um período de 12 horas, terdiurna 8 horas, e assim continuamente.

As ondas de gravidade são oscilações atmosféricas de menor escala, que apresentam períodos curtos. As fontes de geração mais comuns de ondas de gravidade são os ventos sobre montanhas, a convecção e o cisalhamento de vento (Fritts e Alexander, 2003).

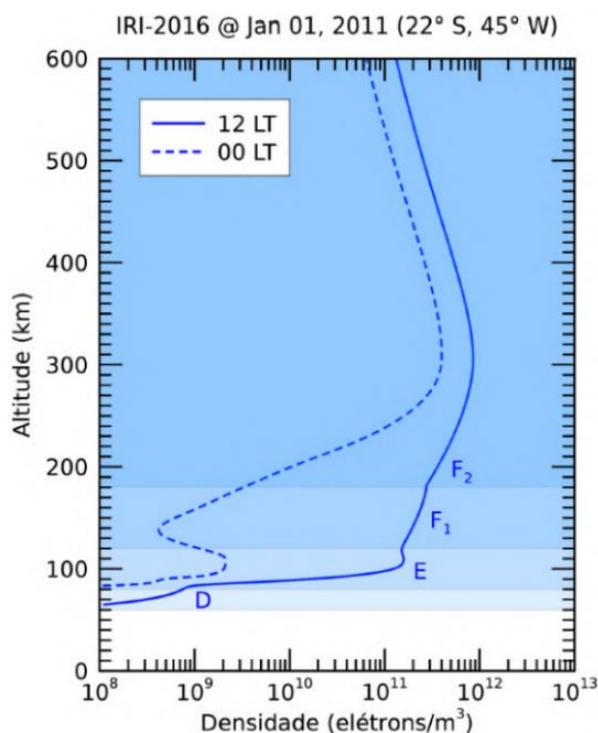
2.4 Ionosfera Terrestre

Situada por volta dos 60 a 2000 km de altura da superfície da Terra, a ionosfera terrestre é uma região da atmosfera repleta de íons e elétrons livres com densidade capaz de interferir na propagação de ondas de rádio (Rishbeth; Garriott, 1969). A quantidade de cargas livres se deve à ionização dos constituintes atmosféricos neutros.

O processo de ionização predominante ocorre por meio da absorção da radiação solar nas faixas do ultravioleta (UV, do inglês *Ultraviolet*), extremo ultravioleta (EUV, do inglês *Extreme Ultraviolet*) e raios-X, e recebe o nome de fotoionização solar (Kelley, 1989; Kivelson; Russel, 1995). Outro modo de ionização é chamado de ionização por impacto, onde as partículas energéticas colidem com as partículas neutras, removendo elétrons de suas moléculas. Este processo ocorre habitualmente em regiões de altas latitudes devido à grande precipitação de partículas na atmosfera terrestre, porém também ocorre significativamente na região da AMAS (Moro et al., 2022; Sinnhuber et al., 2012; Abdu; Batista, 1977). Visto que a fotoionização é predominante e depende diretamente da irradiância solar, a densidade eletrônica é maior no período diurno (Rishbeth, 1988).

A densidade eletrônica da ionosfera é uma das principais características quando o interesse é na propagação de ondas de rádio (Rishbeth, 1988). Esta densidade pode sofrer perturbações durante explosões e tempestades geomagnéticas. O perfil vertical da densidade eletrônica diurna e noturna, linha contínua e tracejada respectivamente, durante baixa atividade solar, pode ser visualizado na Figura 2.4.

Figura 2.6 – Perfil vertical diurno (12h LT (do inglês *Local Time*)) e noturno 00h LT (do inglês *Local Time*) da densidade eletrônica para a região de Cachoeira Paulista no dia 01 de janeiro de 2011, obtido a partir do modelo IRI-2016.



Fonte: Chen, 2019.

As letras D, E, F₁ e F₂ indicam as regiões que compõem a ionosfera. As camadas F₁ e F₂ pertencem à região F, a mais alta da ionosfera, se estendendo de 150 km a até 2000 km da superfície do planeta. Entre 60 a 90 km de altitude, encontra-se a região D, a mais baixa da ionosfera. Entre estas duas regiões, por volta dos 80 a 150 km, está localizada a região E, de enorme relevância para este trabalho, visto que é nela que se localizam as camadas Es.

2.5 Região E

A ionização da região E é sobretudo devida à fotoionização, o que faz com que sua densidade eletrônica diminua em períodos noturnos, apresentando valores próximos de 5×10^3 elétrons/cm³, enquanto em períodos diurnos estes valores podem chegar a ordem de 10^5 elétrons/cm³. A região E se comporta de maneira muito similar às camadas de Chapman, de tal forma que se pode expressar a frequência crítica da onda ordinária da região E (f_0E) pela Equação 2.1 (Rishberth; Garriott, 1969).

$$f_0E = 9 \times 10^3 \left(\frac{q_0}{\alpha} \cos \chi \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.1)$$

onde o χ é o ângulo zenital solar, q_0 é a taxa de produção e α o coeficiente de recombinação (Rishbeth e Garriott, 1969).

2.6 Camadas Es

As camadas Es possuem uma maior densidade de elétrons comparada com a região E, tendo uma espessura menor do que 10 km (Hadoulpis, 2011). As camadas Es localizam-se entre 90 km e 150 km de altura, região E da ionosfera, e também são caracterizadas por sua intensa variação em termos de altura e frequência. Diferente de outros parâmetros ionosféricos, o parâmetro fE_s não se agrupa em torno de um valor médio, sendo caracterizado pela alta variabilidade. Por exemplo, as camadas Es podem não ocorrer durante várias horas, e surgirem muito intensas com fE_s maior que 10 MHz logo em seguida. Por essa razão, a palavra “esporádica” deve ser entendida no sentido de que esses adensamentos no plasma ionosférico são imprevisíveis, mas estatisticamente comuns, principalmente durante a primavera e verão (como será visto no capítulo de resultados).

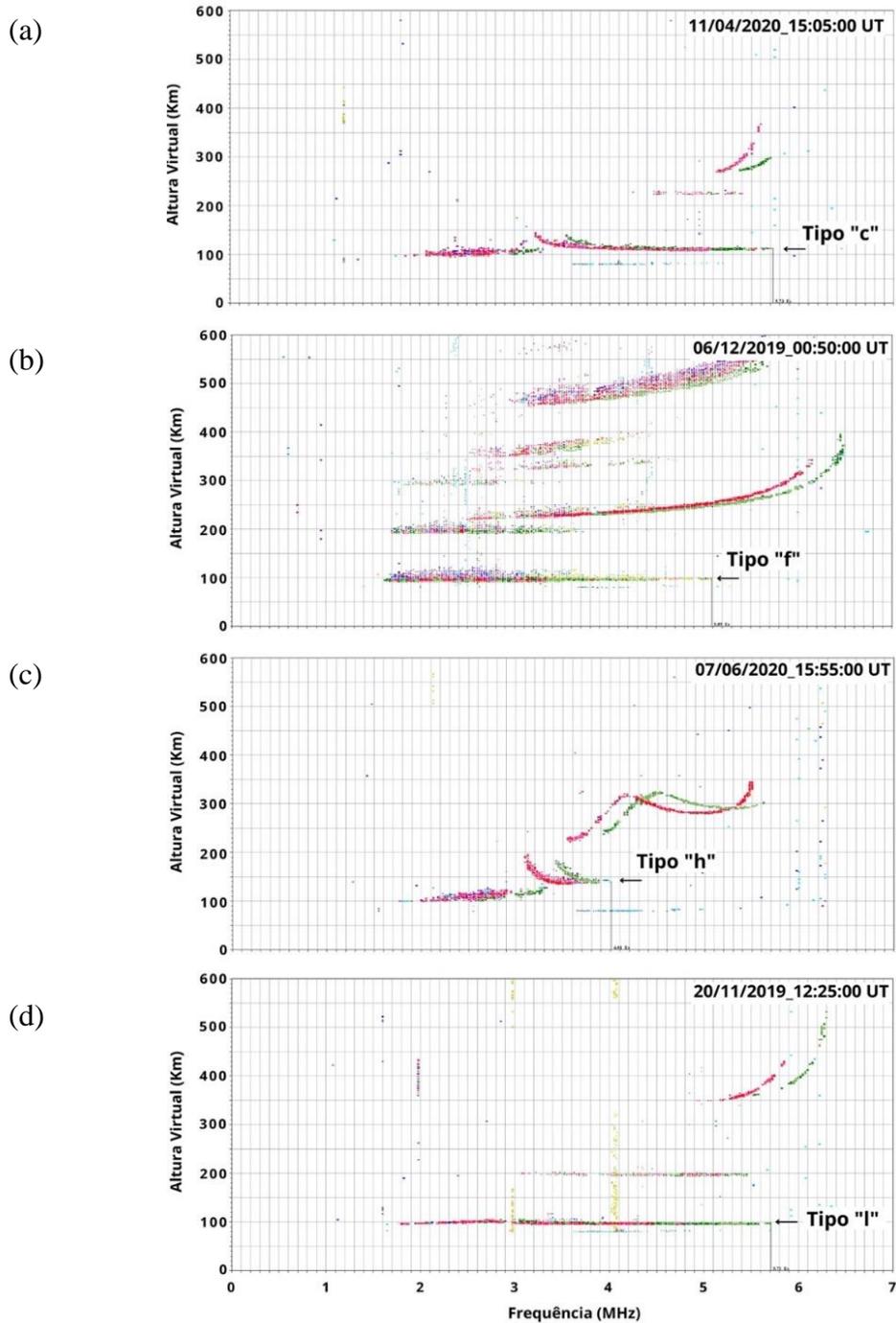
A formação das camadas Es dependem primordialmente da latitude onde elas estão sendo observadas. Dependendo da sua localização geográfica, a camada pode apresentar diferentes tipos de mecanismos de formação. Em regiões equatoriais, sua formação se deve principalmente aos campos elétricos situados no equador geomagnético, onde a inclinação do campo magnético é nula. Já em regiões de altas latitudes (regiões aurorais), as camadas Es estão mais relacionadas ao campo elétrico e à precipitação de partículas energéticas, devido à alta inclinação das linhas de campo geomagnético. Em médias latitudes, o principal mecanismo de formação é o cisalhamento de ventos (ver Figura 2.8).

2.6.1 Tipos de Camadas Es

De acordo com a apresentação nos ionogramas e tipos de formação, atribui-se diferentes classificações a estas camadas, sendo, as observadas sobre Santa Maria,

causados pela ação dos ventos de maré: E_{sc} (*cusp*), E_{sf} (*flat*), E_{sh} (*high*) e E_{sl} (*low*) apresentadas na Figura 2.7 e caracterizadas na Tabela 2.1, na sequência.

Figura 2.7 – Ionogramas ilustrando os diferentes tipos de camadas esporádicas (Es), formadas pela ação dos ventos de maré, sobre Santa Maria, (a) Camada E_{sc} ; (b) Camada E_{sf} ; (c) Camada E_{sh} e (d) Camada E_{sl} .



Fonte: Adaptada de Stefani (2021).

Tabela 2.1 – Características dos tipos de Camadas Esporádicas.

Tipo	Nome	Características do Traço	Local e Período de Ocorrência	Mecanismo de Formação
c	Cúspide (<i>cusp</i>)	Simétrico em relação a frequência crítica da camada E, formando uma cúspide contínuo.	Latitudes temperadas. Apenas diurno.	Ação dos ventos de maré
f	Plana (<i>flat</i>)	Altura invariante ao longo da frequência observada.	Latitudes temperadas. Visível apenas em períodos noturnos.	Ação dos ventos de maré
h	Alta (<i>high</i>)	Similar ao traço da camada “c”, porém apresenta uma descontinuidade em seu pico e um traço de altura superior.	Latitudes temperadas. Período diurno.	Ação dos ventos de maré
l	Baixa (<i>low</i>)	Análogas ao do tipo “f”.	Latitudes temperadas. Período diurno.	Ação dos ventos de maré

Fonte: Adaptada de Stefani (2021).

2.6.2 Formação das camadas Es

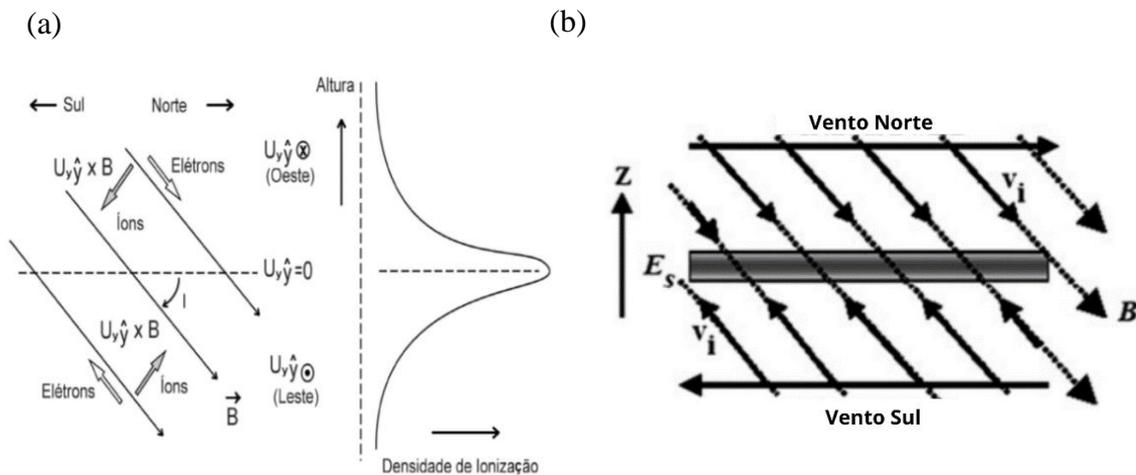
Em regiões similares a Santa Maria (região de transição), ou regiões de baixas e médias latitude, o surgimento das camadas Es se deve, predominantemente à presença de ventos de marés. A oposição da direção das componentes de velocidade dos ventos na ionosfera, caracteriza um processo denominado de cisalhamento de ventos.

A linha pontilhada horizontal na Figura 2.8(a) representa o local onde a velocidade do vento de maré é igual a zero ($\mathbf{U}_y \hat{y} = 0$). As linhas de campo magnético (\mathbf{B}) são representadas pelas setas que formam um ângulo de inclinação (I) com a linha pontilhada, onde $\mathbf{U}_y \hat{y} = 0$.

A velocidade dos ventos na direção oeste, segundo o referencial adotado, está entrando na página (\otimes), enquanto na direção Leste está saindo da página (\odot). Fazendo \mathbf{U}

$\times \mathbf{B}$, pela regra da mão direita, vê-se que os íons se deslocam para a região central (onde se tem o campo magnético), o mesmo ocorre do outro lado. Então, nesta região, há um adensamento na densidade eletrônica que é este pico que pode ser visualizado no lado direito da Figura 2.8(a), que é o adensamento denominado de camada Es. Isso para as componentes zonais (leste-oeste). O cisalhamento de ventos na componente meridional (norte-sul), pode ser visto na Figura 2.8(b) onde se tem vento norte e vento sul e, de maneira análoga, a formação da camada Es sendo que a velocidade dos íons (\mathbf{v}_i) está sendo dada por estas setas que vão em direção da formação da camada Es que está sendo representada por esta faixa mais larga na região central da figura (Resende, 2014; Batista, 2009; Haldoupis, 2011).

Figura 2.8 – Mecanismo de cisalhamento de ventos: (a) zonal e (b) meridional.



Fonte: (a) Adaptada de Carrasco, 2005; (b) Adaptada de Haldoupis, 2011.

3 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS

Para a elaboração deste relatório o principal equipamento utilizado foi a ionossonda digital, do tipo Digissonda, modelo DPS-4D. Esse equipamento é descrito em maiores detalhes na Seção 3.1. A Seção 3.2 detalha a metodologia utilizada neste trabalho.

3.1 Digissonda

Inicialmente conhecida como ionossonda, seu principal objetivo era medir distâncias de objetos refletivos através de sinais de rádio, neste caso, os constituintes das camadas atmosféricas. Com o avanço tecnológico, toda a sondagem ionosférica passou a ser digital, e desde 1969 as ionossondas digitais fabricadas e comercializadas pela *Lowell Digisonde International* (LDI), Massachusetts, EUA, são chamadas de Digissondas (Reinisch e Galkin, 2011). Pode-se mencionar ainda que existem outros tipos de ionossondas digitais, que são produzidas por outros fabricantes.

A Digissonda é composta de uma antena transmissora, quatro antenas receptoras e um sistema de processamento de dados. A antena transmissora (Figura 3.1(a)) emite ondas eletromagnéticas na faixa de rádio, com frequências que variam de 0,5 a 30 MHz com passo de 25 kHz.

A camada ionosférica é um meio dispersivo para estas ondas de rádio. Desprezando os efeitos do campo magnético terrestre e as colisões entre partículas neutras e elétrons, o índice de refração do plasma ionosférico (μ) pode ser obtido da seguinte forma (Ratcliffe, 1960):

$$\mu = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}, \quad (3.1)$$

onde ω_p é a frequência angular do plasma e ω a frequência angular da onda transmitida pela Digissonda. Estas frequências são definidas, respectivamente como:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{\rho e^2}{m \epsilon_0}} \quad (3.2)$$

e

$$\omega = 2\pi f, \quad (3.3)$$

onde ρ é a densidade do plasma (elétrons/m³), e é a carga do elétron ($-1,602 \times 10^{-19}$ C), m é a massa do elétron ($9,107 \times 10^{-31}$ kg), ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ C²/Nm²), e f é a frequência da onda transmitida pela Digissonda. Substituindo as Equações 3.2 e 3.3 na Equação 3.1, tem-se:

$$\mu = \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{\rho e^2}{m\varepsilon_0}\right)}{(2\pi f)^2}} = \sqrt{1 - \frac{\rho e^2}{4\pi^2 m\varepsilon_0 f^2}}. \quad (3.4)$$

Ou ainda:

$$\mu^2 = 1 - \frac{\rho e^2}{4\pi^2 m\varepsilon_0 f^2}. \quad (3.5)$$

Na atmosfera neutra, $\mu = 1$, uma vez que a densidade eletrônica é zero. À medida que se adentra na ionosfera, a concentração de íons e elétrons livres aumenta, e, conseqüentemente, μ tende a diminuir, até se tornar nulo. Para essa situação:

$$0 = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \therefore 1 = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (3.6)$$

$$\therefore \omega^2 = \omega_p^2 \quad (3.7)$$

$$\therefore \omega = \omega_p. \quad (3.8)$$

No momento que a frequência da onda eletromagnética transmitida pela Digissonda se iguala a frequência do plasma ($\omega = \omega_p$), os sinais emitidos pelo sistema são refletidos pelas camadas ionosféricas (Reinisch e Galkin, 2011). Substituindo os valores conhecidos na Equação 3.5, tem-se:

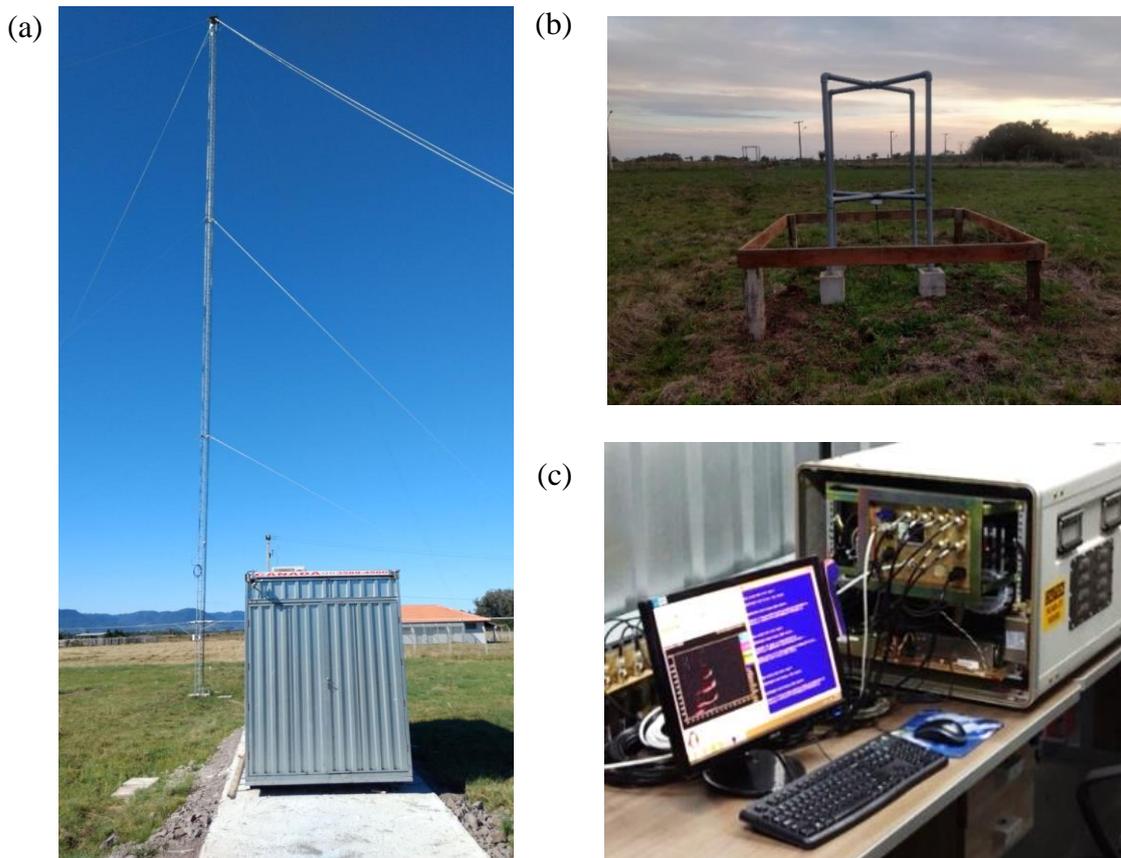
$$\rho = \frac{4\pi^2(9,107 \times 10^{-31})(8,854 \times 10^{-12})f^2}{(-1,602 \times 10^{-19})^2} \left[\frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \cdot \text{MHz}}{\text{C}^2} \right], \quad (3.9)$$

portanto, explicitando ρ , obtém-se uma relação simples entre a densidade eletrônica (elétrons/m³) e a frequência da onda eletromagnética emitida pela Digissonda (f em MHz).

$$\rho = 1,24 \times 10^{10} f^2 \left[\frac{\text{elétrons}}{\text{m}^3} \right]. \quad (3.10)$$

Os ecos refletidos pela ionosfera são recebidos pelas quatro antenas receptoras (Figura 3.1(b)) que seguem um padrão triangular de maneira a reduzir a interferência, melhorar o sinal eletromagnético refletido pela ionosfera, e deduzir o ângulo de chegada das ondas eletromagnéticas. Os sinais recebidos pelas antenas são pré-amplificados e processados por computadores embarcados (plataformas de controle e de dados) na Digissonda (Figura 3.1(c)).

Figura 3.1 – Apresentação do sistema da Digissonda localizada em Santa Maria. (a) Antena transmissora; (b) Uma das quatro antenas receptoras; (c) Parte eletrônica (plataformas de controle e de dados).



Fonte: Stefani (2021).

3.2 Metodologia

Considerando os dados obtidos em Stefani (2021) e os objetivos a serem alcançados, foram realizadas análises distintas. Primeiramente, foi realizada uma análise estatística a fim de se obter a visão geral, por meio de uma plotagem massiva, dos valores máximos e mínimos da frequência de topo (ftEs), de bloqueio (fbEs), e da altura virtual da camada Es (h'Es). Também pretendeu-se obter, por meio desta análise, a visão específica para cada estação do ano, da média e do desvio padrão destes mesmos parâmetros. Por consequência dessas análises, foi necessário o cálculo do coeficiente de variabilidade no intuito de se obter as maiores variações dos parâmetros. O coeficiente de variabilidade foi obtido por meio da equação 3.11:

$$\text{Coef. de Variabilidade} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{Média}} \times 100 \quad (3.11)$$

Posteriormente, uma outra análise foi realizada com o intuito de verificar os valores dos parâmetros h'Es, ftEs, fbEs e da diferença entre as frequências ($\Delta fEs = ftEs - fbEs$) em razão do horário ao longo do ano. A diferença (ΔfEs) é uma medida da variação do gradiente da densidade eletrônica, que nos possibilita obter uma evidência da presença de irregularidades alinhadas ao campo magnético (*E-region Field-Aligned-Irregularities* (FAIs)) sobre Santa Maria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

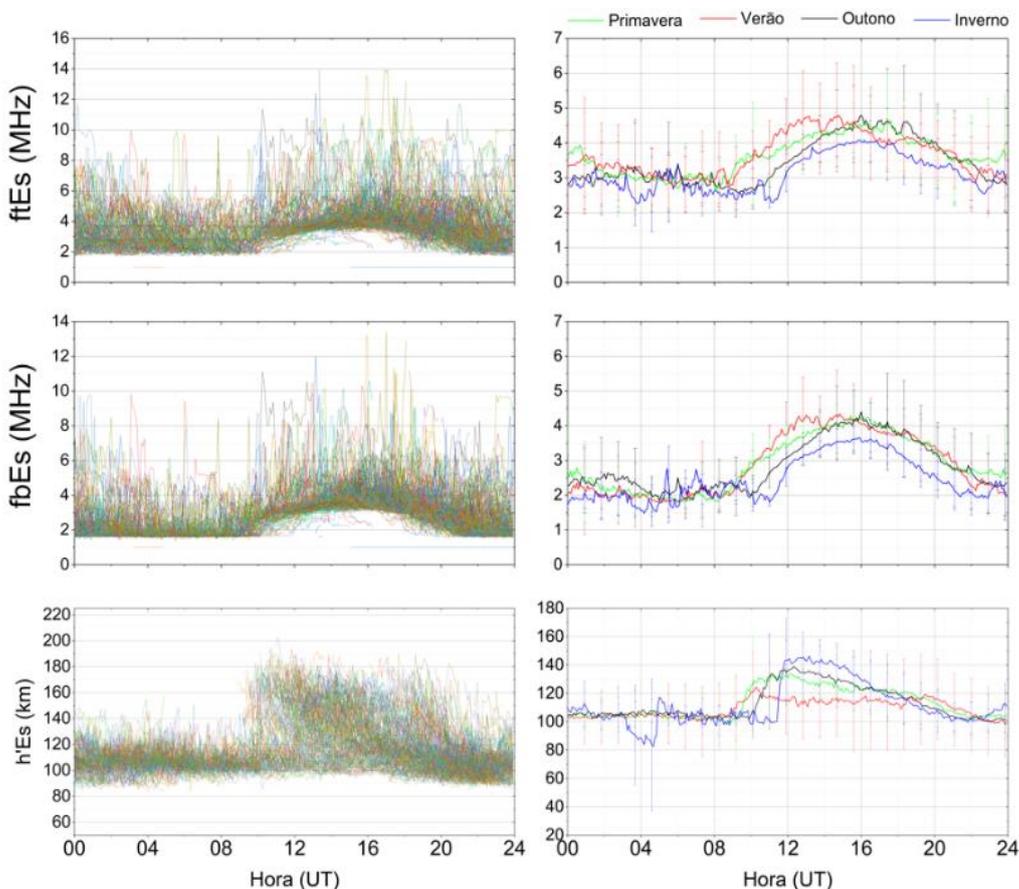
Utilizando-se os instrumentos e métodos descritos anteriormente, obteve-se os resultados descritos neste capítulo. A Seção 4.1 apresenta os resultados da análise estatística dos parâmetros da Es, bem como os do cálculo dos coeficientes de variabilidade. Os resultados das variações diárias dos parâmetros da Es são expostos na Seção 4.2.

4.1 Análise Estatística dos Parâmetros da Es

A variação dos parâmetros f^oEs , f^bEs e $h'Es$ em função da hora universal UT obtidos considerando todos os dados analisados pode ser visto à esquerda da Figura 4.1.

À direita, é exposta a média (traço horizontal) e o desvio padrão (traço vertical) destes parâmetros, divididos em estações do ano, onde: verde representa a primavera, vermelho o verão, preto o outono e azul o inverno.

Figura 4.1 – Variações das frequências de topo e bloqueio (f^oEs , f^bEs) e da altura ($h'Es$) das camadas Es, ao longo do ano e das estações do ano, sobre Santa Maria.



Fonte: Produção da autora (2022).

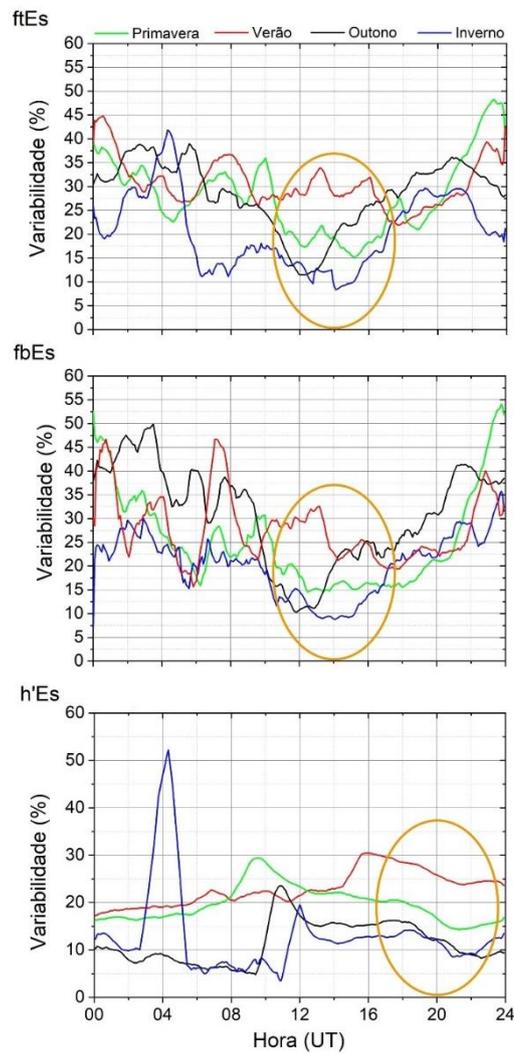
Analisando os gráficos à esquerda, pode-se visualizar valores mais intensos das frequências entre 10 e 18 UT; nesses horários também se encontram os maiores valores do h'Es, variando de 120 a 180 km. Essa característica deve-se à incidência da radiação solar. Observando os painéis à direita, visualiza-se que todas as médias estão dentro do desvio padrão calculado, para todas as estações do ano. Isso não permite que se possa concluir algo sobre a média em relação as estações do ano, porém é possível utilizar o conceito do coeficiente de variabilidade para se calcular uma medida da dispersão desses dados, como é discutido a seguir.

4.1.1 Coeficientes de Variabilidade

Devido ao alto desvio padrão encontrado nos painéis à direita da Figura 4.1, fez-se necessário o cálculo dos coeficientes de variabilidade destes parâmetros para obter uma medida da variabilidade dos parâmetros de acordo com a estação do ano. O resultado do coeficiente de variabilidade é mostrado na Figura 4.2.

Apesar de grandes flutuações do coeficiente de variabilidade, entre 12 e 16 UT, para as frequências, observa-se que durante o verão os valores são maiores que no inverno, como podemos ver no intervalo destacado; também, durante 16 e 24 UT vemos que para a altura, o verão se sobressai ao inverno. Nos três parâmetros, o outono e primavera apresentam coeficiente de variabilidade similar. Esse comportamento explica os valores tão elevados, do desvio padrão, nos gráficos apresentados nos painéis à direita da Figura 4.1.

Figura 4.2 – Coeficientes de variabilidade dos parâmetros de frequência (ftEs, fbEs) e da altura virtual da camada Es, sobre Santa Maria, ao longo do ano e das estações do ano.

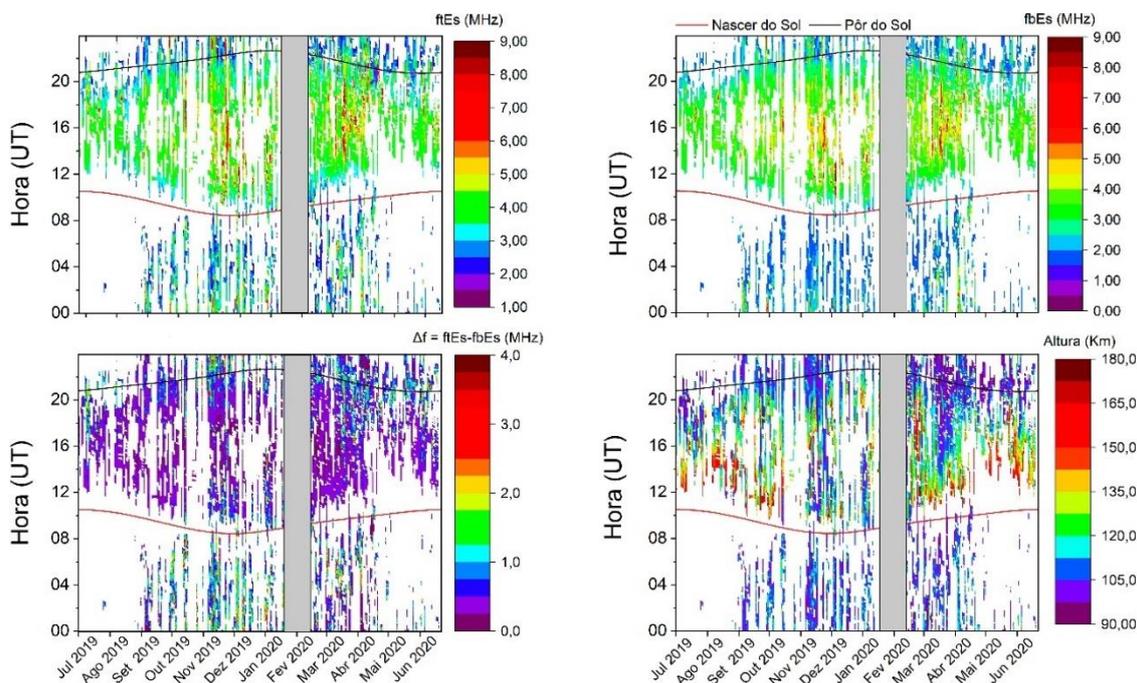


Fonte: Produção da autora (2022).

4.2 Variações Diárias dos Parâmetros da Es

Posteriormente foi realizado uma análise da intensidade da das frequências, da diferença entre as frequências (Δf) e da altura. Os resultados obtidos são expostos na Figura 4.3. Nestes gráficos, os espaços em branco, correspondem horários em que não houveram camada Es. A barra cinza é um período sem dados, devido a manutenção do equipamento (Digissonda). A linha vermelha indica o nascer do sol e a linha preta o pôr-do-sol.

Figura 4.3 – Variações diárias dos parâmetros fE_s , f_bE_s e $h'E_s$ das camadas Es, sobre Santa Maria.



Fonte: Produção da autora (2022).

Por meio da análise destes gráficos, nota-se que os parâmetros fE_s , f_bE_s e $h'E_s$ são maiores durante o dia. A diferença (Δf) mostra um comportamento oposto ao que é visto para f_bE_s e fE_s , uma vez que os valores mais intensos ocorrem em horários noturnos. Alguns trabalhos (Yan et al., 2022; Zhou et al., 2018) discutem que este comportamento pode estar associado com irregularidades alinhadas ao campo na região E (FAIs) após o pôr-do-sol. Essas irregularidades não foram estudadas e ainda não há como realizar estes estudos, pois se faz necessária a instalação de um radar VHF na região de Santa Maria.

5 CONCLUSÃO

As principais conclusões deste estudo são:

- Os gráficos que mostram a variação anual dos parâmetros de frequência indicam valores mais intensos entre 10 e 18 UT; nesses horários também se encontram os maiores valores do h'Es (120 a 180 km);
- Ao analisar a média e o desvio padrão dos parâmetros ftEs, fbEs e h'Es não é possível inferir qual a estação do ano que se apresenta com maiores valores;
- Apesar de grandes flutuações do coeficiente de variabilidade, observa-se que durante o verão os valores do coeficiente são maiores que no inverno, entre 12 e 16 UT; outono e primavera apresentam coeficiente de variabilidade similares;
- A diferença (Δf) mostra um comportamento oposto ao que é visto para fbEs e ftEs, uma vez que os valores mais intensos ocorrem em horários noturnos. Segundo alguns autores (Yan et al. 2022 e Zhou et al. 2018) valores $\Delta f > 4\text{MHz}$ estão associados com irregularidades alinhadas ao campo magnético na região E (FAIs).

Com todas análises realizadas no decorrer deste trabalho, obteve-se um amplo estudo estatístico sobre a ocorrência e variabilidade dos diversos tipos de camadas Es que ocorrem na região de Santa Maria. Este estudo permitiu também a obtenção de um enorme conhecimento sobre a dinâmica das camadas Es na região central da AMAS.

Como uma perspectiva para o futuro, pretende-se investigar a existência das irregularidades alinhadas ao campo da região E (FAIs), sendo necessário para isso a instalação de um radar VHF na região. Utilizar modelo de camadas Es (MIRE) e de ventos de marés (GSWM) para estudar a influência das marés na formação da camada Es sobre Santa Maria.

REFERÊNCIAS

- Abdu, M. A., Batista, I. S. (1977). **Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source.** Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, v. 39, n. 6, p. 723–731. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(77\)90059-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(77)90059-9).
- Abdu, M. A., Batista, I. S., Carrasco, A. J., Brum, C. G. M. (2005). **South Atlantic Magnetic Anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67(17-18), 1643–1657. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.014>.
- Andrioli, V.F., Clemesha, B.R., Batista, P.P, and Schuch, N.J. (2009). **Atmospheric tides and mean winds in the meteor region over Santa Maria (29.71S; 53.81W),** J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 71, 18641876.
- Arras, C., Jacobi, C., Wickert, J. (2009). **Semidiurnal tidal signature in sporadic E occurrence rates derived from GPS radio occultation measurements at higher midlatitudes.** Ann. Geophys. 27, 2555–2563. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-27-2555-2009>.
- Batista, I. S., Abdu, M. A. (1977). **Magnetic storm delayed sporadic E enhancements in the Brazilian geomagnetic anomaly.** Journal of Geophysical Research, v. 82, n. 29, p. 4777-4783.
- Carrasco, A. J. (2005), **O pico pré-inversão na deriva vertical de plasma e a camada E esporádica.** São José dos Campos: INPE, Brasil. [Thesis].154p. (INPE-13054-TDI/1022)
- Chen, S. S. (2019). **Desenvolvimento de um modelo empírico para a obtenção da curva do dia calmo geomagneticamente (QDC).** Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – São José dos Campos: INPE.
- Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Moro, J. Chen, S. S. (2016). **Occurrence of the blanketing sporadic E-layer during the recovery phase of the October 2003 super storm.** Earth, Planets and Space, 68, 1-9.
- Fritts, D. C.; Alexander, M. J., **Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere,** Rev. Geophys., v 41, n 1, 1003, p 3.1-3.64, 2003. [online]. Acesso em 20 de out de 2021. doi:10.1029/2001RG000106.
- Haldoupis, C. (2011). **A tutorial review on sporadic E layers, aeronomy of the earth's atmosphere–ionosphere.** IAGA book series. 29:381–394. doi:10.1007/978-94-007-0326-1_29.
- Hartmann, G.A., Pacca, I.G., (2009). **Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly.** An. Acad. Bras. Ciencias, 81, 243-255. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000200010>.
- Kelley, M. C. (1989). **The Earth's ionosphere. Plasma physics and electrodynamic** 1st ed. R. Dmowska & J. R. Holton, eds., San Diego, CA: Academic Press.

Kivelson, M. G.; Russel, C. T. (1995). **Introduction to Space Physics**. Cambridge University Press, Inglaterra.

Moro, J., Xu, J., Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Silva, R. P., Liu, Z., et al. (2019). **On the sources of the ionospheric variability in the South American Magnetic Anomaly during solar minimum**. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 7638–7653. <https://doi.org/10.1029/2019JA026780>.

Moro, J., Xu, J., Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Da Silva, L. A., Chen, S. S., et al. (2022). **Different sporadic-E (Es) layer types development during the August 2018 geomagnetic storm: Evidence of auroral type (Esa) over the SAMA region**. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2021JA029701. <https://doi.org/10.1029/2021JA029701>.

MURGATROYD, R. J. (1970). **Dynamical modelling of the stratosphere and mesosphere, p 105-121, In: Fiocco, G. ed. Mesospheric models and related experiments**. Dordrecht: D.Reidel Publishing Company.

Oliveira, D. M. e Silveira, M.V.D. (2016). **Clima espacial e choques interplanetários**. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online]. 2016, v. 38, n. 1 [Acessado 10 Março 2022], 1305. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11173812083>>. Epub 05 Abr 2016. ISSN 1806-9126. <https://doi.org/10.1590/S1806-11173812083>.

Oliveira, A. G. I., Rockenbach, M., Pacini, A. A. (2014). **Raios cósmicos e a heliosfera (Cosmic rays and the heliosphere)**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 36. doi:10.1590/S1806-11172014000200016.

Olsen, N.; Stolle, C. **Satellite geomagnetism**. (2012). *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 40, n. 1, p. 441–465, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105540>. 3, 4, 7

Pinto JR., O.; Gonzalez, W. D.; Pinto, I. R. C. A.; Gonzalez, A. L. C.; Mendes JR., O. (1992). **The South Atlantic Magnetic Anomaly: three decades of research**. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 54, n. 9, p. 1129–1134. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90137-A](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90137-A).

Reinisch, B., e Galkin, I. **Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO)**, (2011) *Earth, Planets, and Space*, 63. 377-381. 10.5047/eps.2011.03.001.

Reisenfeld, D. B., Bzowski, M., Funsten, H. O., Heerikhuisen, J., Janzen, P. H., Kubiak, M. A., McComas, D. J., Schwadron, N. A., Sokół, J. M., Zimorino, A., Zirnstein E. J. (2021). **A Three-dimensional Map of the Heliosphere from IBEX**. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 254, nº 2. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/abf658>.

Resende, L. C. A., Batista, I. S., Denardini, C. M., Batista, P. P., Carrasco, J. A., Andrioli, V. F., & Moro, J. (2017). **Simulations of blanketing sporadic E-layer over the Brazilian sector driven by tidal winds**. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, 154, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.12.012>.

Resende, L. C. A., Batista, I. S., Denardini, C. M., Carrasco, J. A., Andrioli, V. F., Moro, J., Batista, P. P., Chen, S. S. (2016). **Competition between winds and electric fields in the formation of blanketing sporadic E layers at equatorial regions**. *Earth, Planets and Space*, 68:201, doi 10.1186/s40623-016-0577-z.

Resende, L. C. A. (2014). **Estudo sobre a formação e dominância das camadas E esporádicas considerando a competição entre ventos e campos elétricos**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Rishbeth, H., Garriott, O. K. (1969). **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic.

Rishbeth, H. (1988). **Basic physics of the ionosphere: a tutorial review**. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, v. 58, n. 6, p. S207–S223. Disponível em: DOI: 10.1049/jiere.1988.0060.

Sinnhuber, M.; Nieder, H.; Wieters, N. (2012). **Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere**. *Surveys in Geophysics*, v. 33, n. 6, p. 1281–1334, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9201-3>.

Stefani, G. (2021). **Estudo da Variabilidade das Camadas E-Esporádicas na Região Central da Anomalia Magnética da América do Sul (Amas)**. Relatório final de iniciação científica PIBIC/INPE 2020-2021.

Whitehead, J. (1961). **The formation of the sporadic-E in the temperate zones**. *J Atmos Solar-Terr Phys* 20(1):1155–1167. doi:10.1016/0021-9169(61)90097-6.